

成岩作用对豫西北马家沟组三段遗迹化石 充填物孔隙发育的影响

董小波¹, 牛永斌^{1,2}

(1 河南理工大学资源环境学院; 2 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室)

摘要 豫西北奥陶系马家沟组三段碳酸盐岩的野外露头观察和室内测试分析结果表明, 马家沟组三段的岩性以泥晶灰岩为主, 岩石中具有典型的遗迹化石充填特征。遗迹化石充填物经历了白云石化、胶结、溶蚀、压实/压溶、去白云石化等成岩作用, 其中溶蚀作用对充填物孔隙发育具有建设性, 压实作用和去白云石化作用具有破坏性, 而白云石化作用、胶结作用和压溶作用则具有建设性和破坏性的双重影响。潜穴充填物的孔隙类型主要以白云石晶间孔、晶间次生溶孔和晶内次生溶孔为主。随着成岩环境的变化, 孔隙度经历了降低—升高—降低—升高的反复演化过程。早成岩阶段的白云石化作用对于潜穴充填物孔隙的发育贡献最大, 此后充填物孔隙度的提升主要依赖于表生环境下大气淡水的淋滤溶蚀, 而遗迹化石充填物经成岩改造后对提高宿主岩层的储层物性具有促进作用。

关键词 河南省西北部; 早奥陶世; 马家沟组; 石灰岩; 遗迹化石; 成岩作用

中图分类号: TE122.2³

文献标识码: A

遗迹化石是地史时期生物的生命活动在沉积物和其他底质中所留下的痕迹^[1-3], 生物造迹过程中的倒置、压缩和回填沉积物将导致遗迹潜穴充填物物理参数的改变, 包括颗粒大小以及分选性的修改或再分配等^[2]。国际上, 以Gingras等人为代表的一批学者对各类储层中受成岩改造后的遗迹潜穴充填物及其围岩基质的孔渗性进行对比研究后指出, 遗迹潜穴是成岩期岩层中各类流体运移的主要通道^[4-11]; 他们还造成这一结果的成岩因素进行了分析, 包括碳酸盐岩遗迹化石的白云石化作用和溶蚀作用等成岩改造, 并使这一研究成为国际上碳酸盐岩储层研究中的热点。在我国, 前人通常用“豹斑灰岩”一词来描述这种在华北奥陶系(尤其是马家沟组)中普遍存在的含遗迹化石的石灰岩^[12-15], 有部分学者提出其豹斑形态为生物潜穴成因, 但一致认为潜穴中的充填白云石主要是成岩期的灰泥被白云石化流体次生交代所形成的^[12-17]。

在豫西北奥陶系马家沟组碳酸盐岩中, 遗迹化石广泛分布^[18]且高密度发育, 但目前对于该地区马家沟组中遗迹化石的成岩作用和物性研究较少, 还仅停留在遗迹化石及其组构的识别与划分上^[18]。本文在总结前人研究资料的基础上, 利用野外露头观察、薄片鉴定、扫描电镜等分析手段, 对豫西北马家沟组碳酸盐岩中遗迹潜穴的成岩作用及其对充填物孔隙发育的影响进行了研究。期望该研究为今后进一步分析遗迹化石对碳酸盐岩储层物性的改造效应、探讨这种改造效应在遗迹化石发育层中垂向上和横向上的演变以及控制遗迹化石发育的沉积环境因素等提供参考。

1 区域地质与成岩演化

研究区位于豫西北焦作地区北部(含焦作市、修武县和博爱县)(图1), 属太行山隆起南段。区内广泛出露奥陶系马家沟组海相碳酸盐岩地层。构造上, 研

收稿日期: 2014-10-05; 改回日期: 2015-01-04

本文受国家自然科学基金“豫西奥陶系碳酸盐岩中生物遗迹组构与储层改造效应”(编号: 41102076)和“海相碳酸盐岩储层中增强储集性能遗迹组构的属性表征及制约机制”(编号: 41472104)、“构造与油气资源”教育部重点实验室开放基金“豫西北奥陶系碳酸盐岩储层生物改造机理研究”(TPR-2011-34)以及河南理工大学博士基金(编号: B2011-046)联合资助

董小波: 1988年生, 现为河南理工大学在读硕士研究生。研究方向: 遗迹学与盆地分析。通讯地址: 454000 河南省焦作市山阳区世纪大道2001号河南理工大学资源环境学院; E-mail: xiaobodong@163.com

究区处于东亚裂谷系NNE向的华北裂谷带与近EW向的西安—郑州—开封扭性转换带的交汇部位^[19]。受加里东运动的影响,华北板块于中奥陶世末开始隆升剥蚀,直到晚石炭世才又重新接受沉积了海陆交互相含铁/铝/煤岩系。早海西期,由于古亚洲洋向南俯冲,再加上石炭纪末至早二叠世的华北板块与秦岭—大别微板块碰撞,华北板块受到两侧相向的挤压而再一次抬升;至晚二叠世,海水逐步直至完全退出华北地块并逐渐转变为陆相沉

积^[20]。至印支期,华北广大地区基本上继承了晚海西期以来的构造格局和沉积特点,整体处于隆升剥蚀状态^[21-22]。晚侏罗世—早白垩世,太平洋板块活动开始显现对华北地区构造演化的控制地位^[22],伴随着新生代以来因印度大陆与欧亚大陆的碰撞和持续的陆内汇聚作用的影响,华北地区发生断陷隆升等构造作用,形成了现今的断块隆起山脉,期间经历了多期构造应力场的转变,形成了大量张性和张扭性断裂^[23]。

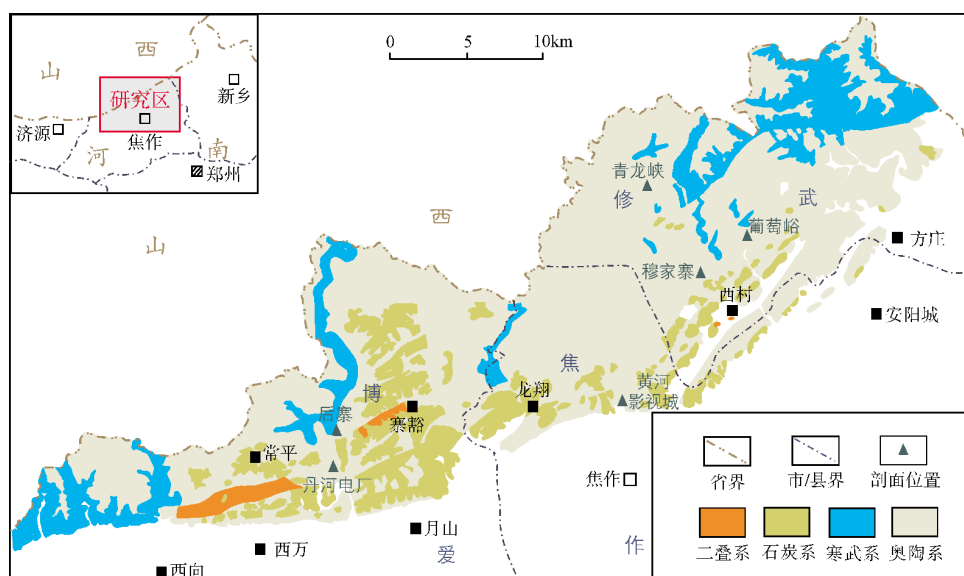


图1 豫西北焦作地区北部地理位置、地层分布以及剖面位置

依据岩性,研究区马家沟组自下而上可以划分为七个岩性段,其中马家沟组三段的岩性主要为泥晶灰岩、含白云石泥晶灰岩、白云质泥晶灰岩及泥晶灰质白云岩等(图2),沉积环境为台地潮坪环境的潮间—潮上—蒸发潟湖^[18]。马家沟组三段的遗迹化石自形成后伴随着各期构造演化所发生的不同类型、不同期次的成岩作用以及在成岩改造下充填物孔隙发育的特征,是本文研究的重点。

经过大量野外实地踏勘观察,本文选择研究区

遗迹化石发育且保存状态较为良好的6处典型剖面(分别为后寨、丹河电厂、黄河影视城、穆家寨、葡萄峪、青龙峡剖面)作为研究对象(图1)。对马家沟组三段在纵向上分20个小层进行密集采样,并对各采样层由下而上编号(图2)。勘察表明,在这些剖面中,马家沟组三段中的遗迹化石不仅种类较多、丰度较高(野外剖面中遗迹潜穴丰度较高处,潜穴的体积可占据所采岩样的60%~90%),且在地层的横向上和纵向上分布均较广泛(表1,图2)。

表1 豫西北地区马家沟组三段中遗迹化石的主要类型及其所出现的露头剖面点

遗迹化石类型	发育遗迹化石的露头剖面
<i>Thalassinoides callianassa</i> (海生迹模式种)	后寨, 丹河电厂, 黄河影视城, 葡萄峪, 穆家寨, 青龙峡
<i>Helminthopsis abeli</i> (阿伯尔拟蠕行迹)	葡萄峪, 穆家寨, 青龙峡
<i>Chondrites cf. intricatus</i> (缠结丛藻迹)	黄河影视城, 穆家寨, 葡萄峪, 青龙峡
<i>Palaeophycus tubularis</i> (管状古藻迹)	葡萄峪
<i>Planolites montanus</i> (山地漫游迹)	后寨, 葡萄峪, 穆家寨



图2 豫西北地区奥陶系马家沟组三段遗迹化石和岩性特征

根据区域构造演化特征^[20-23]可知,马家沟组三段灰岩的遗迹化石自形成后,经历了埋藏环境与表生环境的两轮交替演变(图3),即:(1)加里东中期(O₁—O₂)埋藏环境;加里东晚期—海西早期(O₃—C₁)表生成岩环境;(2)海西中—晚期(C₂—P)埋藏环境;印支期以来(T—Q)的表生成岩环境。在不同时期的不同成岩环境下,各成岩作用类型又划分了不同期

次,而不同期次的成岩作用对充填物中孔隙的发育有各自不同的影响(图3)。

2 成岩作用类型及其对充填物孔隙发育的影响

在综合对比各剖面马家沟组三段遗迹化石发育特征的基础上,重点对后寨、葡萄峪和穆家寨三处剖

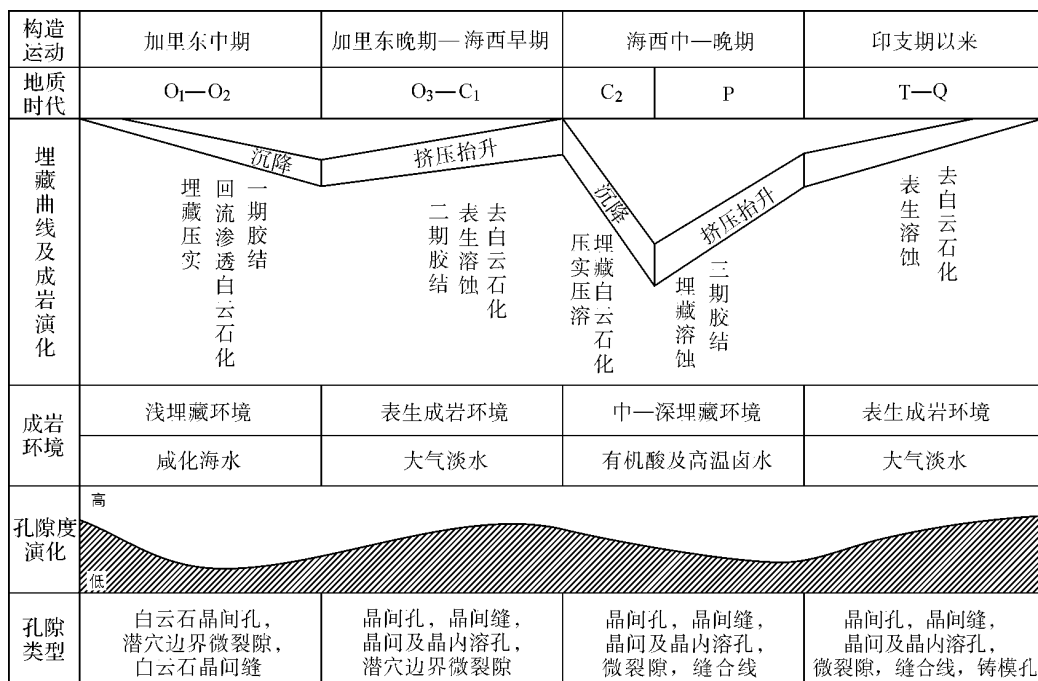


图3 豫西北马家沟组三段成岩环境演化及其孔隙演化示意图

面中的含有5类遗迹化石的石灰岩进行采样分析。通过对这些岩样进行薄片分析及扫描电镜观察等研究发现,岩样中的遗迹化石均受到较大程度的成岩作用改造,其成岩类型主要有白云石化作用、胶结作用、溶蚀作用、压实/压溶作用、去白云石化作用等。

2.1 白云石化作用

通过对取自多层的多种类遗迹化石的薄片进行染色观察分析发现,其潜穴充填物在成分上多为白云石,镜下观察可见晶粒大小不一,从泥晶至细晶均有出现,但总体上以粉晶状态居多。白云石晶粒贴面接触或凹凸接触,以半自形—他形为主,染色后呈现一定的淡蓝色,晶粒时常存在雾心亮边现象。充填物的白云石化作用通常比较彻底,灰泥残余较少,潜穴白云石与围岩泥晶方解石基质之间多呈突变过渡(图4a)。可以看出的是,白云石化时期流体几乎仅仅沿着潜穴通道运移,这与充填物和围岩之间成岩固结后存在孔渗性差异直接相关,因此充填物白云石晶粒应当属于成岩期白云石化的产物。

笔者认为遗迹潜穴的白云石化主要存在两个阶段:(1)奥陶纪浅埋藏环境下回流渗透白云石化;(2)石炭纪一二叠纪中—深埋藏环境下埋藏白云石化。马家沟组三段含遗迹化石石灰岩分布较为普遍,具

有分布层多量大的特点(图2),遗迹化石发育层累计厚度共18.42m,占三段总厚度的49.36%;部分岩层中的潜穴体积占该岩层体积的80%以上,且潜穴充填物的白云石化程度十分剧烈。如此大规模的白云石化决定了流经潜穴的白云石化流体的量必须十分巨大,即具备能够提供大量镁离子来源的物质。前人提出的几种镁离子来源(如黏土矿物释放、不稳定组分向稳定组分转化释放以及生物捕获等)均存在量上的局限性,唯一能够做到此规模的依然为海水^[24]。

在奥陶纪浅埋藏环境下,马家沟组三段整体的沉积环境以潮上带蒸发环境为主,通常在遗迹化石发育层的上方会出现一定厚度且连续成层的白云岩。该白云岩层沉积物的形成期应当处于一种富镁的海水条件下,这样才能形成一整层的富镁的不稳定组分(高镁方解石及文石),以便于之后进行白云石化交代;甚至在该层的准同生期可能发生过蒸发泵白云石化作用,形成的富镁海水向下回流渗透,促使下方的遗迹潜穴普遍发生白云石化,潜穴中的白云石基本都是在这个阶段形成。由于回流渗透作用的结晶速度相对较快,因此所形成的白云石自形程度稍差,且回流交代过程中白云石化流体逐渐淡化。在白云石晶粒生长过程中明亮晶壳围绕晶核不断增生,故而可形成白云石的雾心亮边结构^[25]。

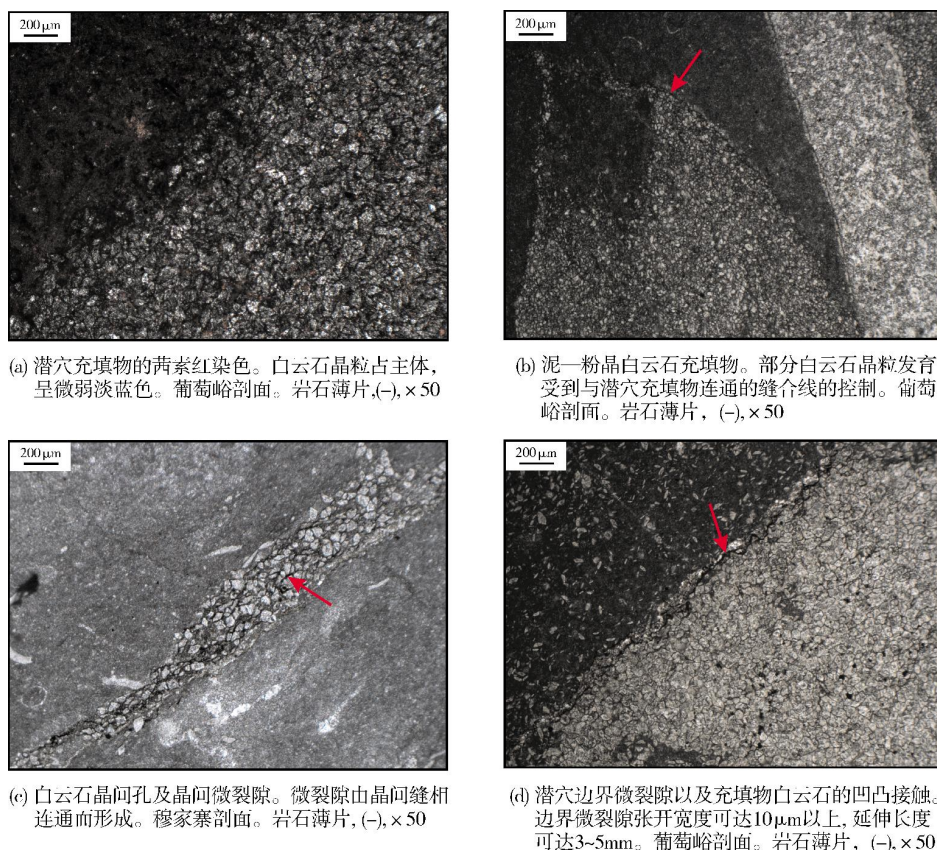


图4 豫西北马家沟组三段遗迹化石充填物的白云石化特征

而在石炭纪—二叠纪的中—深埋藏环境下, 马家沟组三段中则主要是潜穴白云石在原有基础上进行加强和调整, 如泥—粉晶白云石向粉—细晶白云石的转化。在此环境中, 高温以及还原条件对二价铁离子的催化 (充填物白云石晶粒受茜素红染色后呈现淡蓝色), 能够促使多种来源的含 Mg^{2+} 水体 (如构造热液等) 转化为白云石化流体^[26]。潜穴白云石晶粒的发育受控于沟通潜穴的缝合线 (图 4b), 这也证明了在此环境下存在白云石化流体沿缝合线进入潜穴可对充填物进行交代, 但由于这种作用在地层中的分布不均匀, 故而潜穴白云石晶粒因发生重结晶而增大的程度不同——笔者认为这是遗迹潜穴出现不同粒级白云石晶粒的主要原因。

笔者认为, 潜穴充填物与围岩之间在孔渗性上的差异 (充填物孔渗性高, 围岩孔渗性低), 导致白云石化过程中潜穴管道会形成相对独立的成岩体系, 其中泥晶方解石及其胶结物的同时溶解也为白云石的沉淀提供了部分 CO_3^{2-} 来源。在此情况下, 潜穴的白云石化对于充填物孔隙的发育具有双重作

用: (1) 在潜穴白云石晶粒含量少于 50% 的初始阶段, 白云石漂浮于泥晶基质中, 不仅占据了一定的孔隙空间 (使孔隙度下降), 而且因白云石化而增加的那部分孔隙又被此时期的埋藏压实所破坏, 造成孔隙度不升反降; (2) 当白云石晶粒含量达到并超过 50% 时, 开始担当充填物中的支撑格架作用^[27], 抵抗进一步的压实, 且会形成一些大的晶间孔 (图 4c), 使孔隙度上升。除此之外, 因 Mg^{2+} 的离子半径比 Ca^{2+} 小, 故当等摩尔的 Mg^{2+} 交代等摩尔的 Ca^{2+} 时, 所形成的白云石颗粒往往比先前的方解石颗粒小, 可发生一定程度的体积收缩^[28], 这也是白云石化导致孔隙度增高的原因之一。因此, 一定程度的白云石化作用, 不仅会在晶粒接触处形成一些晶间缝 (图 4c), 也会在潜穴边界与围岩接触位置形成一些潜穴边界微裂隙 (图 4d), 使得“凝结成块”的充填物与围岩形成类似于“断开”的状态。这两者的形成, 也会增加充填物的孔隙度。总体而言, 此阶段随白云石含量的增加, 孔隙度升高。当潜穴灰泥基质基本被交代完毕, 白云石化流体却进一步作用, 继续增大的白云石晶

粒晶面会发生曲化,朝向孔隙中生长,发生过白云石化作用^[30]。晶粒呈凹凸式接触在一起(图 4d),不仅造成其自形程度的下降,且会导致部分晶间孔被再次堵塞,孔隙度重新下降。

2.2 胶结作用

胶结作用对于充填物孔隙发育具有双重影响。镜下观察到的胶结物类型可分为三个世代。

第一世代 为单向纤状、纤柱状方解石(图 5a)和文石(图 5b)胶结物。前者呈悬垂形的集合体形态分布于围岩基质中受早期压实而发生塑性变形的灰泥颗粒周围,后者残存于潜穴白云石晶间孔中。两者均指示了海水渗流带成岩环境,故而认为它们形成于海底近地表环境中。第一世代胶结物堵塞了潜穴中的部分晶间及粒间孔,但它们对于上覆地层作用于潜穴的压实却起到了一定的支撑格架作用^[29],同时对未被胶结物完全充填的剩余孔隙起了保护作用。

第二世代 为水菱镁矿(图 5c)、等轴细粒方解石(图 5d)和共轴连晶方解石(图 5e)等胶结物,它指示了淡水潜流带或受大气淡水影响的成岩环境。水菱镁矿发育在白云石化作用后的晶间孔或次生溶孔内,等轴细粒方解石胶结物的生长也明显受白云石化产生的潜穴边界微裂隙的控制,而共轴连晶胶结物更是产生于潜穴白云石晶粒的背景之上,由此表明这三者的形成时间均应晚于白云石化时期。笔者认为,第二世代主要形成于加里东运动晚期导致的表生成岩环境中,其胶结物的形成对充填物的孔隙起了堵塞破坏作用,而共轴连晶方解石这种粗粒胶结物更是因其致密少孔而造成孔隙的大量损失。

第三世代 主要为受缝合线以及成岩微裂隙等中晚期成岩构造控制而发育的白云石(图 5f, 5g)和中—粗粒亮晶方解石(图 5h)胶结物,它指示了石炭纪—二叠纪中—深埋藏成岩环境。白云石胶结物也是此时期埋藏白云石化的产物,是白云石化流体沿缝合线及微裂隙等通道运移时沉淀产生的,但它在潜穴中的表现是白云石的继续生长充填,因此对孔隙发育也存在两方面的影响,即白云石晶粒增大过程中的孔隙度升高以及后期发生过白云石化而导致的孔隙度降低,而中—粗粒亮晶方解石胶结物则对充填物的孔隙发育起了破坏作用。

2.3 溶蚀作用

溶蚀作用对于充填物孔隙的发育具有建设性作用。研究区潜穴充填物的溶蚀过程可分为四期(图 3)。

第一期 为组构选择性埋藏溶蚀,主要发生于奥陶纪浅埋藏环境中。回流渗透的富镁海水对充填物中高镁方解石和文石等不稳定组分的溶解和交代,形成大量的方解石晶间溶孔及灰泥颗粒间的次生溶孔,这些孔隙之后成为白云石生长的场所。

第二期 为非组构选择性表生溶蚀,发生于加里东运动晚期导致的表生环境中。遗迹化石受大气淡水淋滤,充填物白云石晶粒间残留的泥晶方解石和第一世代胶结物等发生溶解,形成大量的晶间次生溶孔,这些晶间孔隙后多被第二世代淡水胶结物所充填,部分白云石晶粒自身也因溶解而形成一些晶内孔。

第三期 为非组构选择性埋藏溶蚀,发生于石炭纪—二叠纪埋藏环境中。主要为有机质热分解产生的有机酸和埋藏白云石化流体对已存在的白云石晶粒、二世代胶结物及残存的灰泥进行溶解,将堵塞的晶间孔及晶间溶孔等再次打开及扩大。

第四期 为非组构选择性表生溶蚀,发生于三叠纪以来的表生环境中。因大气淡水淋滤而再次形成大量的晶间和晶内次生溶孔(图 6a, 6b),其中部分白云石晶粒被整体溶解而形成铸模孔(图 6c),暴露于大气淡水之下的潜穴充填物甚至被溶解殆尽,留下一些潜穴形态的孔洞(图 6d)。

2.4 压实/压溶作用

在薄片及扫描电镜下观察,研究区遗迹化石受到的压实作用主要表现为潜穴白云石晶粒的紧密接触、潜穴切面形状的变化以及其中灰泥颗粒的变形等。压实对于充填物的孔隙发育具有破坏作用,这在成岩早期便造成充填物中原生孔隙的大量减少。随着上覆沉积物的增加,到了中—深埋藏环境,伴随温度和压力的升高,埋藏压实演变为压溶作用,其主要标志为缝合线的发育^[30]。

镜下观察到的缝合线多被一些次生矿物如黄铁矿、黑色沥青质及方解石(图 5h)所充填,表明其中曾存在多种流体的先后运移。缝合线往往与潜穴边界及内部的微裂隙相连通而成为潜穴内外成岩流体交

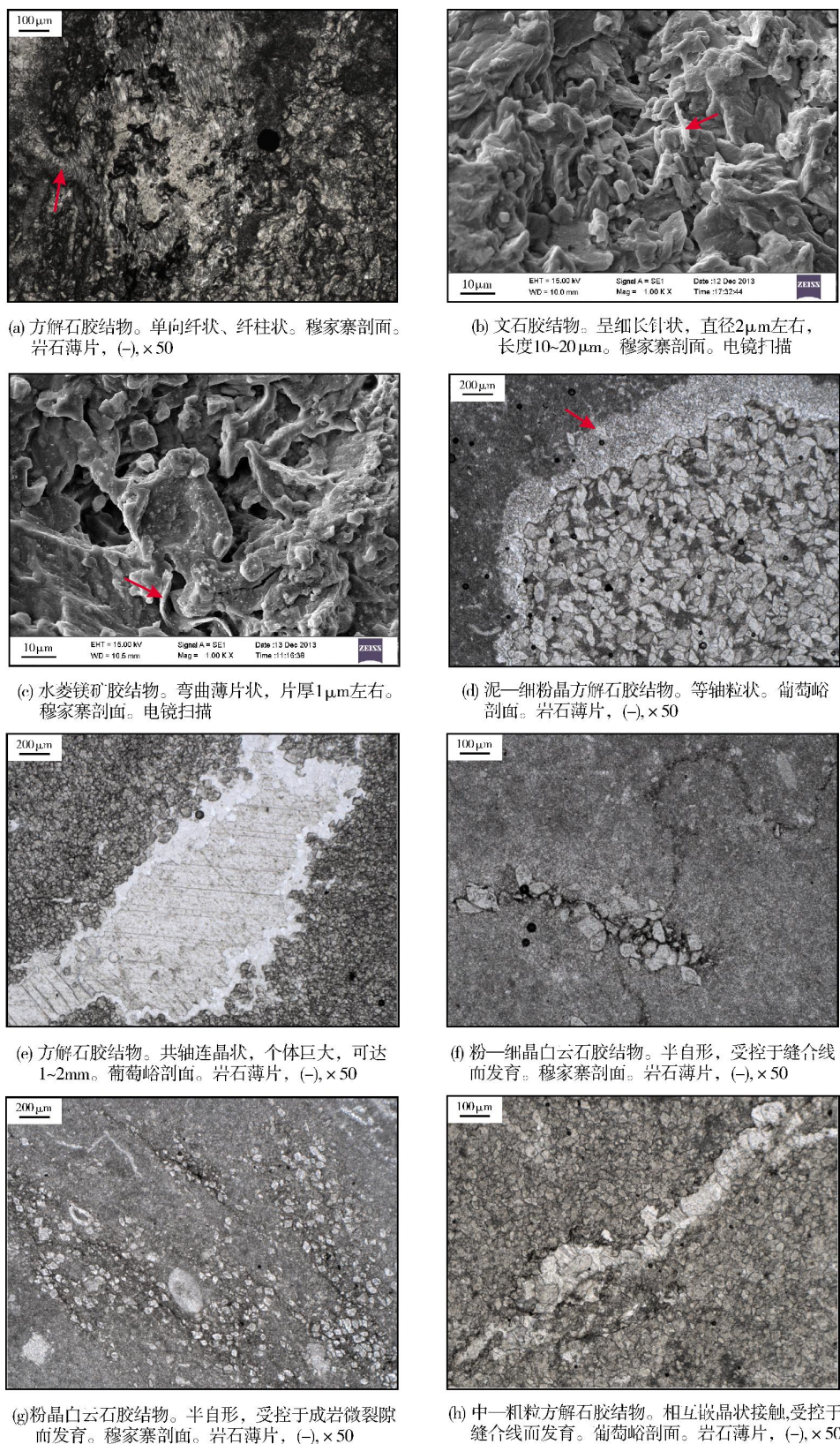


图5 豫西北马家沟组三段遗迹化石充填物的胶结特征

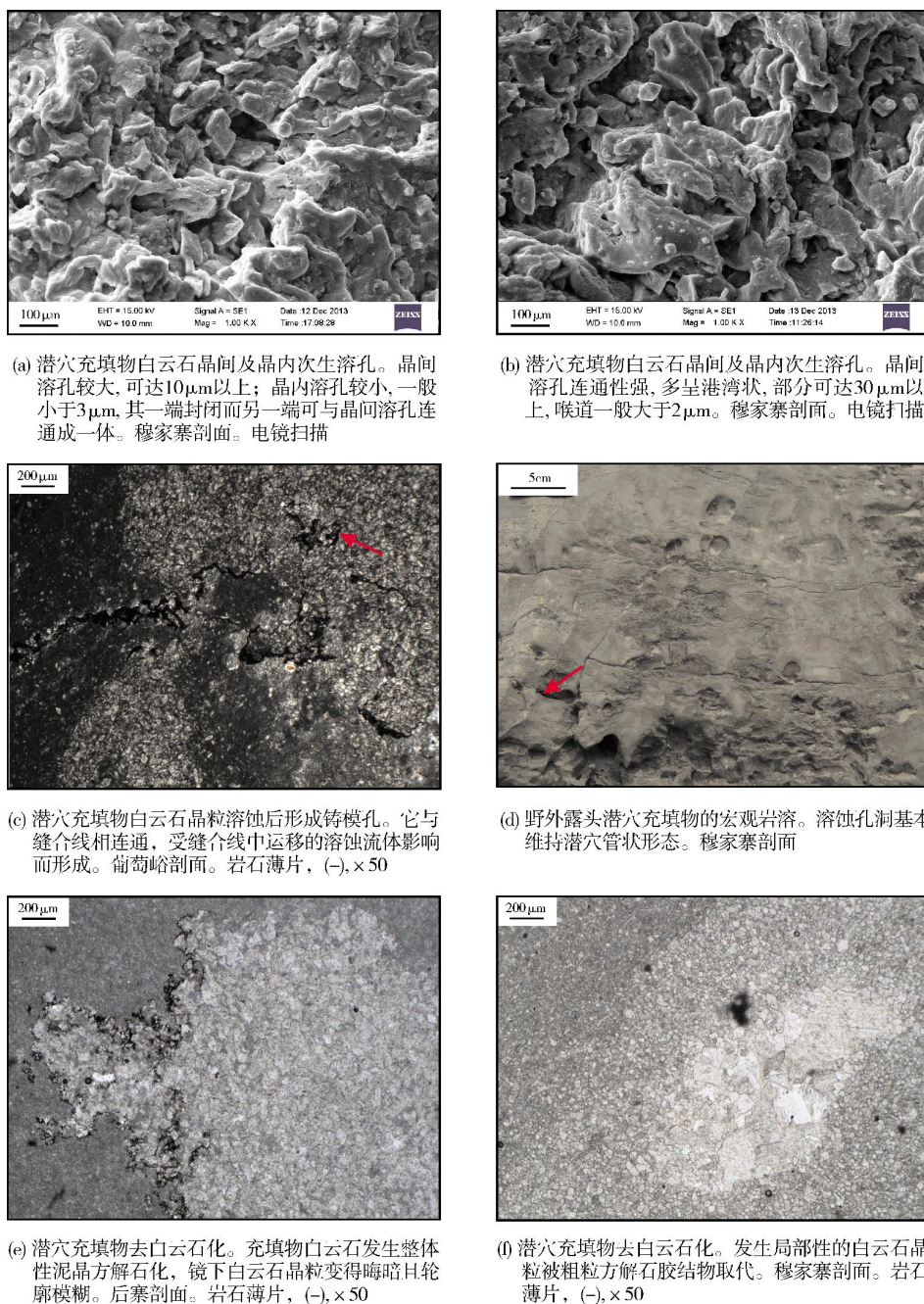


图 6 豫西北马家沟组三段遗迹化石充填物的溶蚀及去白云石化特征

换的重要通道。因此, 压溶作用对于潜穴孔隙发育具有双重影响: 当围岩的压溶产物随流体沿缝合线进入潜穴并以胶结物的形式在孔隙中沉淀下来时, 对孔隙造成破坏(图5h); 但当有机酸、白云石化溶液及大气淡水等溶蚀性流体进入潜穴之后, 会产生次生溶孔及铸模孔(图6c)等, 这对充填物的孔隙发育又具有建设性。

2.5 去白云石化作用

研究区遗迹化石充填物的去白云石化作用主要有两种表现: (1) 白云石晶粒被方解石重新交代后, 发生泥晶方解石化(图6e), 并残留白云石轮廓阴影; (2) 分散的白云石晶粒被粗粒淡水胶结物取代, 凝结成块(图6f), 胶结物边界方解石对白云石的蚕食清晰

可见。两者均对潜穴充填物孔隙发育具有破坏作用。

笔者认为,研究区潜穴充填物的去白云石化作用可分为两期,分别为加里东运动晚期以及三叠纪以来的表生环境下的大气淡水影响(图3)。

3 遗迹化石充填物的孔隙演化

由于在不同成岩环境下各成岩作用对潜穴充填物改造的剧烈程度不同,故而在不同成岩阶段主导充填物孔隙发育及孔隙度变化的成岩作用类型也不相同,这导致了充填物在不同的成岩时期表现出不同的孔隙发育特征及孔隙度演化特征(图3)。

(1)加里东中期(O_1-O_2) 造迹生物在马家沟组三段沉积物的准同生期通过倒置、压缩和回填沉积物制造潜穴,潜穴内充填物的孔渗性相比潜穴外沉积物的要高。之后,遗迹化石因受到沉积物覆盖而进入早期埋藏阶段(O_1-O_2),压实及第一期胶结使得充填物中的孔隙大量减少,孔隙度出现一个迅速降低的阶段,但由于充填物仍然受到准同生期潜穴内外孔渗性差异所带来的影响,因而潜穴开始成为地层中流体运移的主要通道。来自上方的富镁海水使得潜穴发生回流渗透白云石化,充填物孔隙类型发生大幅转变,由连通性较差的方解石晶间孔及灰泥颗粒间孔,转变为连通性较好的白云石晶间孔及晶间缝等。这些孔隙成为此阶段充填物中的主要孔隙类型,孔隙度在经历白云石化前期因压实影响而产生的降低过程后,随着白云石化程度的加深及白云石百分含量的增加而得到提升。整体而言,压实作用与白云石化作用主导了此阶段充填物的孔隙发育,孔隙度经历了先降低后升高的过程(图3)。

(2)加里东晚期—海西早期(O_3-C_1) 受到加里东运动的影响,研究区遗迹化石被抬升到近地表大气淡水环境。由于构造抬升伴随着大量构造裂隙的形成,大气淡水沿着这些通道进入遗迹化石发育层,对遗迹潜穴充填物进行淋滤溶蚀,从而发生第二期表生溶蚀及胶结作用。表生溶蚀作用与胶结作用二者为相逆反应,相互穿插进行,孔隙在胶结堵塞与溶蚀打开的不断交替下形成,而孔隙度的增加或减少则取决于充填物中沉淀与溶解量的差别。笔者认为,此时期遗迹潜穴成岩环境相对开放,大气淡水淋滤量较大,溶解量总体大于胶结物沉淀量,表生溶蚀对此阶段充填物孔隙的发育起主导作用,在原有的白云石晶间孔的基础上,增加了大量白云石晶间及

晶内次生溶孔,孔隙度有所升高。

(3)海西中—晚期(C_2-P) 随着石炭纪—二叠纪含煤岩系的沉积,研究区遗迹化石再次进入埋藏环境。随着埋藏深度的增加和压力加大,深埋藏压实使得孔隙度出现再一次降低。上覆岩层的巨大压力造成围岩基质产生许多微裂隙,压溶现象也开始出现,产生大量缝合线,这些微裂隙及缝合线往往能够沟通潜穴。在此相对封闭的埋藏成岩环境中,潜穴通过这些通道与围岩石质的物质交换成为此时期影响充填物孔隙发育的重要因素。围岩中产生的压溶产物及酸性溶蚀流体等,均会沿此通道进入潜穴并发生第三期胶结与溶蚀,充填物因其较高的孔渗性也往往成为成岩流体易于聚集的地方。带有围岩基质溶蚀产物的流体单向且大量流入充填物中,结晶出的第三世代胶结物则破坏孔隙发育。而溶蚀流体进入充填物后虽产生一定溶解作用,但这些含有溶解产物的流体在逐渐达到饱和状态的过程中往往并不轻易返回围岩基质,而是依然沿着具有较高孔渗特征的充填物运移,这就造成了潜穴在一处发生溶蚀却在另一处又发生沉淀的现象。因此,这时的埋藏溶蚀对于充填物孔隙发育的建设性作用有限,这种充填物被动接收“围岩产物”的状态,使得此阶段潜穴中的胶结量要大于溶解量,孔隙大量减少,导致孔隙度降低。虽然此时期因地温升高而产生的埋藏白云石化会使充填物白云石晶粒得以再次生长,部分潜穴孔隙度在一定程度上又有所上升,但笔者认为,主导此时期充填物孔隙发育的主要是第三期埋藏胶结,相比上一阶段而言,此阶段充填物孔隙类型并未产生显著变化,但其孔隙度整体有所下降。

(4)印支期以来($T-Q$) 因受到太平洋活动域的影响,尤其是新生代以来的各期构造应力场转变,马家沟组的地层中再次产生大量的断裂及裂隙,断裂→裂隙→缝合线→潜穴微裂隙→充填物孔隙(晶间及晶内溶孔、铸模孔)等构成更加完善的流体运移体系,遗迹潜穴成岩环境相对更加开放,受大气淡水影响也更为剧烈。表生溶蚀作用主导了此时期充填物孔隙发育,虽然部分潜穴存在因去白云石化而破坏孔隙的现象,但笔者认为,如同加里东运动晚期导致的表生成岩期一样,在此阶段充填物的孔隙度因大气淡水淋滤溶蚀而有所升高。

根据以上充填物孔隙演化的特征也可以看出,遗迹潜穴充填物的孔隙类型主要以白云石晶间孔以

及晶间和晶内次生溶孔为主,孔隙度随着成岩环境的变化,经历了降低→升高→降低→升高的演化过程,早成岩阶段的回流渗透白云石化作用为其后的成岩改造奠定了基础,而且对于潜穴充填物中孔隙的发育贡献最大,此后充填物孔隙度的提升则主要依赖于表生环境下大气淡水的淋滤溶蚀作用。

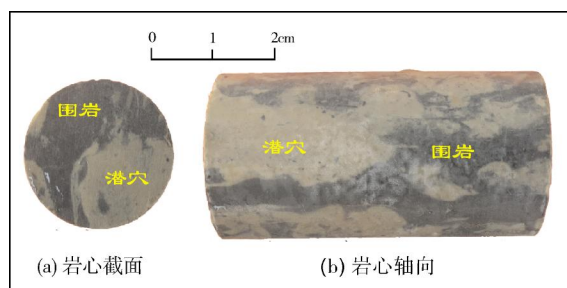
4 遗迹化石充填物的定量分析

为了能够定量分析遗迹潜穴充填物经成岩改造

后对于其宿主岩层物性的影响,笔者对马家沟组三段的含遗迹潜穴的石灰岩柱塞岩样进行了孔渗性测试(表2)。其中每个柱塞(长3~5 cm×直径2.5 cm)均包含有潜穴充填物部分以及一定量的围岩基质(围岩均为泥晶灰岩),其中的潜穴体积占柱塞体积的30%~60%(表2,图7)。可以看出,虽然含遗迹潜穴柱塞中充填物的孔渗特征因围岩基质的存在而被部分屏蔽,但其孔隙度仍可达到不含遗迹潜穴泥晶灰岩柱塞的2~3倍,渗透率可达到3~15倍。

表 2 豫西北马家沟组三段含遗迹化石柱塞样品的孔隙度和渗透率

样品类型	遗迹化石种类	样品数	潜穴管占柱塞体积比 (%)	平均孔隙度 (%)	平均渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)
含遗迹潜穴的灰岩	含 Thalassinoides	11	30~50	0.84	0.758
	含 Thalassinoides 和 Helminthopsis	8	30~60	1.21	4.521
	含 Helminthopsis 和 Chondrites	1	50~60	1.12	0.899
	含 Chondrites	1	50~60	1.52	2.951
泥晶灰岩(对照品)	不含遗迹化石	2	0	0.43	0.308



含遗迹潜穴充填物(土黄色)呈斑块状分布。岩心截面(a)上,斑块占面积的50%左右。岩心轴向(b)上,斑块的连通性被围岩基质(泥晶方解石)所阻隔。穆家寨剖面,岩心

图 7 豫西北马家沟组三段含遗迹化石柱塞样品的特征观测

由于含遗迹潜穴柱塞的孔渗性涉及到所含遗迹化石种类、潜穴管占柱塞的体积比、潜穴管相互之间的连通性、充填物白云石化程度以及潜穴管在柱塞中的延伸方向等多个方面的问题,因此有关研究笔者将另文详细论述。

总体而言,研究区马家沟组三段遗迹化石的成岩改造对其所在岩层储层物性的提升具有极大的促进作用。

5 结 论

(1)豫西北焦作地区北部野外露头剖面马家沟组三段石灰岩中的遗迹化石充填物经历的成岩作用类型主要有:白云石化作用、胶结作用、溶蚀作用、压

实/压溶作用以及去白云石化作用等。对于潜穴充填物的孔隙发育而言,溶蚀作用具有建设性,压实作用及去白云石化作用具有破坏性,而白云石化作用、胶结作用及压溶作用则具有建设与破坏的双重影响。

(2)研究区遗迹化石充填物的孔隙类型主要以白云石晶间孔以及晶间和晶内次生溶孔为主,孔隙度随着成岩环境的变化经历了降低—升高—降低—升高的反复演化过程。早成岩阶段的白云石化作用为其后的成岩改造奠定了基础,且对潜穴充填物孔隙的发育贡献最大,此后充填物孔隙度的提升主要依赖于表生环境下大气淡水的淋滤溶蚀作用,而成岩改造后的遗迹化石对于其宿主岩层储层物性的提升则具有促进作用。

参 考 文 献

- [1] 杨式溥, 张建平, 杨美芳. 中国遗迹化石[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Bromley R G. Trace fossils: Biology, taphonomy and applications[M]. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 1996: 361.
- [3] Seilacher A. Trace fossil analysis [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 75-131.
- [4] Gingras M K, McMillan B, Balcom B J, et al. Using magnetic resonance imaging and petrographic techniques to understand the textural attributes and porosity distribution in Macaronichnus-burrowed sandstone[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(4): 552-558.
- [5] Gingras M K, Mendoza C A, Pemberton S G. Fossilized worm burrows influence the resource quality of porous media[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 875-883.

- [6] Gingras M K, Pemberton S G, Muelenbachs K, et al. Conceptual models for burrow related, selective dolomitization with textural and isotopic evidence from the Tyndall Limestone[J]. *Geobiology*, 2004, 2(1): 21-30.
- [7] Gingras M K, Bann K L, MacEachern J A, et al. A conceptual framework for the application of trace fossils[C]// MacEachern J A, Bann K L, Gingras M K, et al. *Applied Ichnology. SEPM Short Course Notes 52. Society for Sedimentary Geology*, 2007: 1-25.
- [8] Pemberton S G, Gingras M K. Classification and characterizations of biogenically enhanced permeability[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(11): 1493-1517.
- [9] La Croix A D, Gingras M K, Pemberton S G, et al. Biogenically enhanced reservoir properties in the Medicine Hat Gas Field, Alberta, Canada[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43(5): 464-477.
- [10] Baniak G M, Gingras M K, Pemberton S G. Reservoir characterization of burrow-associated dolomites in the Upper Devonian Wabamun Group, Pine Creek Gas Field, central Alberta, Canada[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 48(12): 275-292.
- [11] Cunningham K J, Sukop M C, Curran H A, et al. Prominence of ichnologically influenced macroporosity in the karst Biscayne aquifer: Stratiform "super-K" zones[J]. *GSA Bulletin*, 2009, 121(1/2): 164-180.
- [12] 贾振远, 马淑媛. 山东莱芜地区下古生界豹斑灰岩的成因及其意义[J]. *地质论评*, 1984, 30(3): 224-227.
- [13] 陈战杰, 张镜. 关于“豹皮灰岩”的成因[J]. *矿物岩石*, 1991, 11(2): 41-46.
- [14] 武永强, 吴卓丹. 太原西山奥陶系豹皮灰岩的成因[J]. *山西矿业学院学报*, 1995, 13(2): 161-166.
- [15] 陈曦, 吕波, 黄素, 等. 陕西韩城—旬邑地区中奥陶统马家沟组豹斑白云岩研究[J]. *新疆地质*, 2011, 29(2): 222-225.
- [16] 郝毅, 林良彪, 周进高, 等. 川西北中二叠统栖霞组豹斑灰岩特征与成因[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2012, 39(6): 651-656.
- [17] 龙刚, 黄萍, 林剑怀, 等. 徐州地区寒武系豹皮灰岩的岩性特征及其成因机制分析[J]. *地质学刊*, 2013, 37(1): 67-70.
- [18] 胡斌, 张文涛, 牛永斌. 焦作云台山与青龙峡景区中奥陶统马家沟组沉积特征及演化规律[J]. *河南理工大学学报:自然科学版*, 2011, 30(4): 411-417.
- [19] 耿怡智, 聂怀耀, 郭玉溪, 等. 云台山世界地质公园地质遗迹的基本特征及科学价值[J]. *河南理工大学学报:自然科学版*, 2008, 27(1): 34-39.
- [20] 陈世悦. 论秦岭碰撞造山作用对华北石炭-二叠纪海侵过程的控制[J]. *岩相古地理*, 1998, 18(2): 48-54.
- [21] 李国蓉. 从成岩角度看鄂尔多斯马家沟组碳酸盐岩中的裂缝及其储集意义[J]. *岩相古地理*, 1997, 17(3): 46-53.
- [22] 吴智平, 侯旭波, 李伟. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(4): 385-399.
- [23] 张岳桥, 马寅生, 杨农. 太行山南缘断裂带新构造活动及其区域运动学意义[J]. *地震地质*, 2003, 25(2): 169-182.
- [24] Hardie L A. Dolomitization: A critical view of some current views[J]. *Journal Sedimentary Petrology*, 1987, 57(1): 166-183.
- [25] Folk R L, Land L S. Mg/Ca ratio and salinity: Two controls over crystallization of dolomite[J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(1): 60-68.
- [26] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(5): 32-40.
- [27] 郭峰. 碳酸盐岩沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 39-40.
- [28] 张学丰, 刘波, 蔡中贤, 等. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(3): 79-85.
- [29] 张学丰, 石开波, 刘波, 等. 保持性成岩作用与深部碳酸盐岩储层孔隙的保存[J]. *地质科技情报*, 2014, 32(2): 80-85.
- [30] 钟建华, 孔凡亮, 李阳, 等. 塔河油田四区奥陶系碳酸盐岩油藏中的缝合线研究[J]. *地质论评*, 2010, 56(6): 841-850.

编辑:赵国宪

Diagenesis and Effect of Trace Fossil Fillings on Pore Development in Lower Ordovician Majiagou Member-3 Limestone in the Northwest of Henan

Dong Xiaobo, Niu Yongbin

Abstract: According to observation to the rock samples from 6 outcrops of Lower Ordovician Majiagou Member-3 carbonate rock in the northwest of Henan province, the Majiagou Member-3 mostly consists of micritic limestone full of typical burrow fillings associated with trace fossils. Based on analysis to burrow fillings, diagenesis experienced mainly is dolomitization, cementation, dissolution, compaction-pressolution and dedolomitization during four periods of diagenesis. It is known that dissolution plays a constructive role in filling pore development and compaction and dedolomitization play a destructive role while dolomitization, cementation and pressolution do dual influence. Intercrystalline pores, intercrystalline dissolution pores and intracrystal secondary dissolution pores are the main types of burrow fillings pores. The porosity of burrow fillings experienced twice evolutions from lower to higher as diagenetic environments changed. The dolomitization had done the best contribution for pore development during early diagenetic stage and subsequent increase of porosity mainly depended on leaching and dissolution of atmospheric fresh water in supergene environment. It is proved that diagenetic reformation to burrow fillings in trace fossils can finally improve the reservoir property of host rock.

Key words: Northwest of Henan Province; Early Ordovician; Majiagou Fm.; Limestone; Trace fossil; Diagenesis

Dong Xiaobo: Master degree in progress at Henan Polytechnic University. Add: School of Resources and Environment Engineering of Henan Polytechnic University, 2001 Shiji Av., Jiaozuo, Henan, 454000, China